



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 03 763 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
A 61 B 3/02

②① Aktenzeichen: 101 03 763.5
②② Anmeldetag: 27. 1. 2001
④③ Offenlegungstag: 22. 8. 2002

DE 101 03 763 A 1

⑦① Anmelder:
ASCLEPION-MEDITEC AG, 07745 Jena, DE

⑦④ Vertreter:
DTS München Patent- und Rechtsanwälte, 80538
München

⑦② Erfinder:
Dick, Manfred, 07926 Gefell, DE; Schröder, Eckhard,
90542 Eckental, DE; Mäusezahl, Holger, 07745 Jena,
DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:
US 60 50 687 A
US 60 42 233 A
US 57 77 719 A
US 50 16 977 A
WO 99 27 334 A1

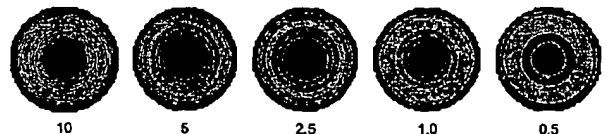
LIANG J. u.a.: Objective measurement of wave
aber-
rations of the human eye with the use of a Hart-
man-Shack wave-front sensor. In: J. Optical Socie-
ty of America A., OPTICS and IMAGE SCIENCE,
Vol.
11, 1994, No.7, S.1949-1957;
Internet: <http://www.cvs.rochester.edn/williamslab/research/option01.html>;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung

⑤⑦ Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnungen Xi in einem optischen System, insbesondere in einem Auge (5), umfassend mindestens einen Beobachtungskanal (15), in den definierte Platten (20) einbringbar sind, wobei die einzelnen Platten (20) optisch aktive Strukturen (21) aufweisen, die zu einem definierten Zernike-Polynomen und zu einer definierten Amplitude korrespondieren, wobei mindestens eine Ordnung Xi der Zernike-Polynome größer als zwei ist.



DE 101 03 763 A 1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung in einem optischen System, insbesondere in einem Auge.

[0002] Zur Qualitätssteigerung optischer Systeme wie abbildende Systeme und Laserstrahlung werden optische Wellenfronten dieser Systeme analysiert. In dem Artikel "Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave front sensor" by Liang et al., Optical Society of America 1994, S. 1949 ff., wird beschrieben, wie man mit Shack-Hartmann-Sensoren Aberrationen höherer Ordnung erfaßt und in Form von Zernike-Koeffizienten der verschiedenen Ordnungen bewerten kann.

[0003] Diese objektive Bestimmung der Zernike-Koeffizienten führt im Ergebnis zu einer Qualitätssteigerung des Systems. Diese objektive Qualitätssteigerung weist jedoch zu dem subjektiv bewerteten Sehvermögen dieses optischen Systems Unterschiede auf.

[0004] Dieser Tatsache wurde für die klassische sphärozyklindrische Korrektur von Refraktionsfehlern des menschlichen Auges dadurch Rechnung getragen, daß der Ophthalmologe mittels Refraktometern objektiv die Korrekturwerte ermittelt und dann zum subjektiven Feinabgleich für den Patienten die endgültigen Daten mittels Probierbrille oder Phoropter und Sehtafel festlegt. Für die höheren Aberrationen (ab 3. Ordnung) enden diese subjektiven Tests lediglich in einer digitalen Entscheidung, daß die Korrektur gewisse Effekte bewirkt oder auch nicht. Ein subjektiver Feinabgleich ist jedoch nicht möglich.

[0005] Um über die normale sphärische und zylindrische Korrektur der Abbildungsfehler hinaus auch die höheren Aberrationen zu korrigieren, kann man theoretisch adaptive Optiken verwenden, die als deformierbare Spiegel in Reflexion oder Flüssigkristalloptiken in Transmission arbeiten. Diese adaptiven Optiken sind jedoch trotz intensiver Bemühungen aufgrund ihrer Empfindlichkeit noch nicht industriell einsatzfähig.

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher ein Verfahren und eine Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnungen in ein optisches System anzugeben, mit denen ein subjektiver Feinabgleich einfach möglich ist.

[0007] Diese Aufgabe wird durch die Vorrichtung und das Verfahren der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterentwicklungen der vorliegenden Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0008] Insbesondere wird die Aufgabe gelöst durch eine Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung X_i in einem optischen System, insbesondere in einem Auge, umfassend mindestens einen Beobachtungskanal, in den definierte Platten einbringbar sind, wobei die einzelnen Platten optisch aktive Strukturen aufweisen, die zu einem definierten Zernike-Polynom und einer definierten Amplitude korrespondieren, wobei mindestens ein Zernike-Polynom eine Ordnung größer als zwei aufweist.

[0009] Ein solches optisches System kann beispielsweise ein Auge sein, insbesondere ein menschliches Auge. Bei dem optischen System kann es sich auch um ein optisches Instrument zur Untersuchung des Augenhintergrundes (Retina) handeln, bei dem der Abbildungsfehler höherer Ordnung des speziell untersuchten Auges kompensiert wird. Weiterhin ist es möglich, optische Instrumente wie Zielfernrohre oder Okulare des Mikroskops zusammen mit dem durch diese hindurchblickenden Auge als optisches System aufzufassen. Außerdem kann ein optisches System ein

strahlenführendes System wie ein Laser bzw. Laserdioden sein, bei denen Abbildungsfehler höherer Ordnungen korrigiert werden sollen.

[0010] Der Beobachtungskanal ist eine definierte Strecke, in der Korrektur Elemente, insbesondere Platten, eingebracht werden können. Dieser Beobachtungskanal kann ein freier Raum, ein Vakuum oder auch ein (teilweise) transmittierendes Medium, wie Luft, Gas oder Flüssigkeit, sein. Besonders bevorzugt ist der Beobachtungskanal eine Röhre, die den sie umgebenden Raum von äußeren Einflüssen wie atmosphärischen Schwankungen, Staub, etc. schützt.

[0011] Abbildungsfehler höherer Ordnungen X_i in einem optischen System sind Abbildungsfehler, die als Wellenfrontaberrationen auftreten und so auf unterschiedlichste Weise mathematisch formuliert werden können. Besonders bevorzugt wird hierbei die Beschreibung der Abbildungsfehler durch Zernike-Polynome. Der Vorteil dieser Beschreibung ist zum einen die Orthogonalität und zum zweiten steht jedes Polynom für einen bekannten Abbildungsfehler in der Optik (Astigmatismus, Koma, etc.). Die Wellenfrontaberration $W(p, \theta)$ wird somit durch die Überlagerung der einzelnen Polynome $Z_n(p, \theta)$ beschrieben.

$$W(p, \theta) = \sum_{k=0}^n k_n Z_n(p, \theta)$$

[0012] Diese Eigenschaft wird in der vorliegenden Erfindung ausgenutzt, indem für jeden Term $k_n Z_n(p, \theta)$ der Summe ein Phasenplattensatz genutzt wird.

[0013] Ausgehend von diesen Eigenschaften der Zernike-Polynome, die Orthogonalität und die Beschreibung eines optischen Bildfehlers, werden die Aberrationen in der vorliegenden Erfindung bevorzugt unabhängig voneinander bestimmt und auskorrigiert. Hierzu wird bevorzugt jeweils ein Satz von Phasenplatten P^m verwendet, die einem Zernike-Polynom $W_z(p, \theta)$ entsprechen und die untereinander in ihrem Koeffizienten k_z (die Amplitude des Wellenfrontanteils) abgestuft sind. Die Abstufung erfolgt dabei derart, daß über Kombinationen jede Amplitude quasikontinuierlich eingestellt werden kann. Für die vorliegende Erfindung wird bevorzugt für jedes Zernike-Polynom – und damit für jeden Abbildungs- bzw. Bildfehler – ein derartiger Satz an Phasenplatten verwendet.

[0014] Neben den Bildfehlern als Parametern hat ein Phasenplattensatz die optische Zone als Kenngröße in der die Wellenfrontkorrektur erfolgt. Auch diese ist universell veränderbar und einstellbar.

[0015] Die einzelnen Platten weisen optisch aktive Strukturen auf, die zu einem definierten Zernike-Polynom und zu einer definierten Amplitude, d. h. zu einem definierten Polynomkoeffizienten k_z , korrespondieren. So kann für einen speziellen Zernike-Koeffizienten, d. h. für einen speziellen Koeffizienten eines speziellen Zernike-Polynoms, eine optisch aktive Struktur auf eine Platte aufgebracht werden, die genau diesen Abbildungsfehler korrigiert. Die optisch aktive Struktur, die auf die einzelnen Platten aufgebracht wird, unterscheidet sich bezüglich eines speziell definierten Zernike-Polynoms von anderen Platten mit dieser optisch aktiven Struktur dann noch durch verschiedene definierte Amplituden bzw. Polynomkoeffizienten. Durch eine sinnvoll gewählte Reihe verschiedener Amplitudenstärken für dasselbe Zernike-Polynom ergibt sich dann beispielsweise ein Satz von Platten, der den einzelnen Abbildungsfehler in verschiedener Intensität korrigiert.

[0016] Besonders bevorzugt können auch mehrere Abbildungsfehler verschiedener Terme von Zernike-Polynomen auf einer Platte zusammengefaßt werden. So ist es denkbar, alle Fehler 4. Ordnung in einer Platte zusammenzufassen

oder auch einzelne Terme der Zernike-Polynome mit unterschiedlichen Koeffizienten auf einer Platte zu realisieren (beispielsweise einen X_1 Koeffizienten k_1 mit Term X_2 und Koeffizienten $k_2 = 2 \times k_1$).

[0017] Hierdurch wird eine Vorrichtung bereitgestellt, bei der durch einfaches Einbringen einer entsprechend definierten Platte ein Abbildungsfehler höherer Ordnung in dem entsprechenden optischen System korrigiert werden kann. Durch Kombination mehrerer Platten, die hintereinander in den Beobachtungskanal eingebracht werden, lassen sich aufgrund der Addition der Zernike-Polynome die Summe der Abbildungsfehler der durch die einzelnen Platten korrigierten Fehler ermitteln bzw. kompensieren.

[0018] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung mit einem Plattensatz von Platten vorgesehen, der optisch aktive Strukturen zur Kompensation von Abbildungsfehlern mindestens eines definierten Zernike-Polynoms aufweist. Hierdurch ist es möglich, daß ein Plattensatz für einen speziellen, einem Zernike-Polynom entsprechenden Abbildungsfehler bereitgestellt wird, bei dem jede Platte dieses Satzes einen speziellen Abbildungsfehler korrigiert. So kann beispielsweise ein Satz Platten zur Kompensation von Abbildungsfehlern eines Zernike-Polynoms dritter Ordnung und zur Kompensation von Abbildungsfehlern eines Zernike-Polynoms vierter Ordnung umfassen. Es ist auch möglich, daß durch weitere Platten Abbildungsfehler von Zernike-Polynomen niedrigerer Ordnung, beispielsweise zweiter Ordnung, korrigiert werden. Durch die Addition von verschiedenen Platten kann dann ein komplexerer Abbildungsfehler, bzw. die gesamte Wellenfront, ermittelt bzw. kompensiert werden.

[0019] Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung vorgesehen, bei der ein Plattensatz einen Untersatz an Platten aufweist, der einzelne Platten mit optisch aktiven Strukturen zur Kompensation von Abbildungsfehlern unterschiedlicher Amplituden für ein definiertes Zernike-Polynom aufweist. Dadurch ist es möglich, bei einem Abbildungsfehler, der einem Zernike-Polynom entspricht, einen Untersatz verschiedener Platten bereitzustellen, die ebenfalls den Abbildungsfehler dieses Zernike-Polynoms kompensieren, jedoch bei unterschiedlichen Amplituden bzw. Koeffizienten. Mit Hilfe eines solchen Untersatzes an Platten ist es möglich, den Abbildungsfehler bezüglich des Polynoms X_n durch wahlweises, iteratives oder alternierendes Einsetzen der verschiedenen Platten des Untersatzes einzugrenzen und besonders fein abzustimmen. Besonders bevorzugt werden die einzelnen Platten eines Untersatzes sortiert und abgestuft zusammengestellt, so daß die einzelnen Platten nach ihren Amplituden geordnet sind. Der Abbildungsfehler kann so sowohl durch die Auswahl einer der Platten des Untersatzes als auch eine Kombination verschiedener Platten desselben Untersatzes sehr genau eingegrenzt werden. Darüber hinaus ist es möglich durch Addition verschiedener Platten aus verschiedenen Untersätzen den gesamten Abbildungsfehler verschiedener höherer Ordnungen X_i in dem optischen System zu korrigieren.

[0020] Besonders bevorzugt ist ein Plattensatz und/oder ein Untersatz an Platten auf einer Kreisscheibe angeordnet. Diese Kreisscheibe befindet sich besonders bevorzugt in einer Vorrichtung, die als Phoropter ausgebildet ist. Dadurch ist es möglich auf bewährte mechanische Strukturen zurückzugreifen, um auf neuartige Weise Fehler der dritten und höheren Ordnung zu bestimmen und zu kompensieren.

[0021] Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist zusätzlich eine Zieleinrichtung für den Patientenblick vorgesehen. Auf diese Weise ist es möglich, hohe Anforderungen an die Ausrichtung der

einzelnen Platten bezüglich der optischen Achse, beispielsweise des hindurchsehenden Auges, zu erfüllen. Als Zieleinrichtung kann die Ein- und Ausgangsaperatur des Phasenplatten-Phoropter verwendet werden. Diese können beispielsweise zentriert werden, so daß die Sehachse des Auges mit der optischen Achse des Phasenplattenphoropter zusammenfällt.

[0022] Besonders bevorzugt werden die Platten aus Glas oder Kunststoff hergestellt. Bevorzugt sind sie aus einem transmittierenden Kunststoff. Die Platten werden bevorzugt mittels Spotschanning-Excimer-Lasern durch Ablation von dünnen Kunststoff- oder Spezialglasplatten hergestellt. Besonders bevorzugt werden die Platten aus PMMA angefertigt. Besonders bevorzugt werden auch andere, leicht mittels Laser bearbeitbare, transparente Materialien verwendet. Der Bearbeitungslaser besitzt vorteilhafterweise ein gaußförmiges Strahlprofil. Weiterhin können punktgenau gesteuerte Bearbeitungsmaschinen der Optikindustrie zur Herstellung der dünnen Glasplatten mit einer hochpräzisen Oberflächenpolierqualität genutzt werden, beispielsweise nach der "single point diamond turning technology". Hierbei werden bevorzugt auch Kristalle verwendet.

[0023] Besonders bevorzugt wird die erfindungsgemäße Vorrichtung zur subjektiv bewerteten Ermittlung der Aberration höherer Ordnung im Rahmen einer Visusbestimmung verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Sehtest, der beispielsweise einer Korrektur durch Sehhilfen oder einem Laser vorgeschaltet ist. Die beispielsweise durch objektive Wellenfrontaberration festgestellten Abbildungsfehler können auf diese Weise nochmals subjektiv fein abgestimmt werden und können so zu einer Qualitätssteigerung der objektiv ermittelten theoretischen Ausgangsdaten herangezogen werden.

[0024] Weiterhin bevorzugt wird die erfindungsgemäße Vorrichtung verwendet, um die Auflösung optischer Instrumente zu optimieren, wie beispielsweise bei Untersuchungen des Augenhintergrundes (Retina) durch Kompensation der Abbildungsfehler höherer Ordnung des speziellen Auges. Bei dieser Beobachtung des hinteren Augenabschnittes zu medizinischen Zwecken spielt bei dieser hochgenauen und hochauflösenden Beobachtung die Aberration des zu untersuchenden Auges eine nicht unerhebliche Rolle, da sie die Auflösung des zu untersuchenden Gebietes einschränkt. Um die Aberration dieses Auges für Beobachtungen mit Funduskamera oder ähnlichem auszugleichen, kann die erfindungsgemäße Vorrichtung genutzt werden und ein Satz von Phasenplättchen in den Strahlengang eingebracht werden, welche die Aberration vollständig ausgleichen. Damit ist die bestmögliche Beobachtung und Auflösung und ein Optimum an optischer Qualität möglich. Besonders vorteilhaft ist bei dieser Verwendung, daß universell für unterschiedliche Augen die Abbildungsfehler schnell kompensiert werden können, indem bevorzugt die Phoropter-Phasenplatten auf einen bekannten Wert eingestellt werden können.

[0025] Besonders bevorzugt wird die erfindungsgemäße Vorrichtung verwendet, um Strahlprofile von Strahlquellen, insbesondere von Laserdioden zu korrigieren. Die Formung von Wellenfronten, die aus Strahlquellen austreten ist eine oftgestellte Aufgabe. Hierbei gibt es vor allem zwei Forderungen. Zum ersten das Bereitstellen von idealen Wellenfrontprofilen (ebene Welle/reines Gaußprofil) und zum anderen die bewußte Deformierung bzw. bewußte Formung von Wellenfrontprofilen. Beispielfhaft soll hier der Einsatz der vorliegenden Erfindung an Laserdioden genannt werden. Für eine breite Anwendung ist die Korrektur bzw. Feinkorrektur des ermittelten Wellenfrontprofils erforderlich. Hierzu wird die Wellenfrontaberration klassisch erfaßt und

mittels Phasenplatten der vorliegenden Erfindung auskorrigiert. Dadurch ist es möglich, mit jeder Laserdiode, die in ihren Wellenfrontaberrationen stark variieren können, ein und dasselbe Wellenfrontprofil zu erstellen. Dies ist mittels der vorliegenden Erfindung leicht und universell möglich. Damit unterscheidet sich dieser Ansatz stark von dem Fertigen einer Korrekturplatte für eine bestimmte Laserdiode für eine bestimmte optische Anwendung. Beim Ausfall der Laserdiode kann die Korrekturplatte nicht mehr verwendet werden und es muß für die neue Laserquelle eine neue Korrekturplatte hergestellt werden. Bei der Verwendung der vorliegenden Erfindung kann dies universell gelöst werden, da nun auch die neue Strahlungsquelle mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung individuell auskorrigiert werden kann.

[0026] Eine weitere vorteilhafte Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung betrifft die individuelle Korrektur von Sehfehlern, insbesondere bei der Verwendung optischer Instrumente. Bei der Verwendung optischer Instrumente kann es zu einer Qualitätserhöhung durch die Korrektur von Abbildungsfehlern höherer Ordnung, insbesondere solcher durch Sehfehler, kommen, indem die erfindungsgemäße Vorrichtung eingesetzt wird. Diese kann beispielsweise beim Zielfernrohr des Jägers oder beim Okular des Mikroskopes verwendet werden. Hier ist es möglich, durch individuelle subjektive Bestimmung der Abbildungsfehler ein Optimum der Auflösung zu erhalten. Hier ist nicht nur ein fehlerfreier Visus sondern sogar ein überproportionaler Visus zu erreichen, der über die volle Sehschärfe hinausgeht.

[0027] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung wird insbesondere auch durch ein Verfahren zur subjektiven Bestimmung eines Abbildungsfehlers einer speziellen höheren Ordnung x in einem optischen System, insbesondere einem Auge, gelöst, bei dem in einem ersten Schritt eine Platte in einen Beobachtungskanal des optischen Systems eingeführt wird, wobei die Platte optisch aktive Strukturen aufweist, die zu einem definierten Zernike-Polynom und zu einer definierten Amplitude korrespondierenden, wobei die Ordnung x des Zernike-Polynoms größer als 2 ist, in einem zweiten Schritt eine subjektive Beurteilung der aktuellen Wellendeformation der definierten Ordnung x erfolgt und in einem dritten Schritt des wiederholten Anwendens des ersten Schrittes mit Platten anderen Amplitudenkorrektur desselben definierten Zernike-Polynoms und des zweiten Schrittes der subjektiven Beurteilung die Platte und damit die Amplitudenkorrektur ermittelt wird, die diesen Abbildungsfehler der speziellen höheren Ordnung x subjektiv am besten kompensiert. Dieses Verfahren kann iterativ oder alternierend eingesetzt werden und führt so zu einem Minimum in der Abweichung. Durch diese universelle Möglichkeit der Analyse von Wellenfrontprofilen, können diese auf einen Zielwert hin kompensiert werden. Durch das Baukastenprinzip kann das Wellenfrontprofil iterativ ermittelt und zu einem Minimum der Abweichung geführt werden.

[0028] In einem besonders bevorzugten Verfahren der vorliegenden Erfindung wird das vorab beschriebene Verfahren für jeden der auftretenden Abbildungsfehler verschiedener Ordnungen $X1-Xn$ nacheinander durchgeführt. Die Addition der Korrekturen für die einzelnen Polynomkoeffizienten ergibt die Gesamtkorrektur der Abbildungsfehler des optischen Systems.

[0029] Die Erfindung soll im folgenden anhand von Zeichnungen weiter erläutert werden. Weitere vorteilhafte Merkmale sind hierbei beschrieben. Es zeigen:

[0030] Fig. 1 einen Plattensatz für die Bildfehler Koma 3. Grades in der x -Achse und sphärische Aberration 3. Ordnung mit jeweils einem Untersatz für Polynomkoeffizienten von 0,5 bis 10;

[0031] Fig. 2 eine Anordnung von Kreisscheiben mit Untersätzen von in jeweils einer Kreisscheibe angeordneten Platten gemäß der vorliegenden Erfindung;

[0032] Fig. 3 eine Anordnung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung bei Untersuchung eines Auges mittels einer Funduskamera; und

[0033] Fig. 4 eine schematische Darstellung der Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Korrektur des Strahlprofils bei Laserdioden.

[0034] In Fig. 1 ist schematisch ein Plattensatz für Bildfehler Koma 3. Grades der x -Achse und sphärische Aberration 3. Ordnung mit jeweils einem Untersatz für Polynomkoeffizienten von 0,5 bis 10 dargestellt. Der Plattensatz für den Bildfehler Koma 3. Grades in der x -Achse gemäß der Formel $W(p, \theta) = (3p^2 - 2p)\sin(\theta)$ ist mit A bezeichnet und der Unterplattensatz für den Bildfehler der sphärischen Aberration 3. Ordnung gemäß der Formel $W(p, \theta) = 6p^4 - 6p^2 + 1$ ist mit B bezeichnet. Diese beiden Untersätze A und B bilden zusammen den Plattensatz gemäß Fig. 1. Die Untersätze A und B bestehen aus jeweils fünf einzelnen Platten, die innerhalb des definierten Zernike-Polynoms für verschiedene Polynomkoeffizienten, das heißt Amplituden, ausgelegt sind.

[0035] So weist der Untersatz A einzelne Platten für Polynomkoeffizienten 0,5, 1,0, 2,5, 5 und 10 auf. Auch der Untersatz B besteht aus fünf Platten mit verschiedenen Polynomkoeffizienten 0,5, 1,0, 2,5, 5 und 10. Mit diesem Plattensatz, bestehend aus den Untersätzen A und B können nun Bildfehler gemäß der beiden angesprochenen Zernike-Polynome bestimmt und kompensiert werden. Diese Abbildungsfehler höherer Ordnungen in diesen optischen Systemen können mit Hilfe dieser geordneten Auswahl von Phasenplatten zielgerichtet ermittelt und kompensiert werden, indem beliebig deformierte Wellenfronten, von denen man bisher die sphärischen und zylindrischen Anteile mit standardmäßigen Optiken korrigiert, zielgerichtet ermittelt und die einzelnen Ordnungen quasikontinuierlich und orthogonal korrigiert. Dies geschieht durch eine Art Baukasten-Prinzip, mit dem eine universelle Ermittlung und Korrektur von beliebigen Wellenprofilen durchgeführt werden kann. So können Bildfehler optischer Systeme minimiert und damit ein Maximum an Abbildungsqualität erreicht werden. Auf diese Weise ist eine universelle Möglichkeit gegeben, Wellenfrontprofile zu analysieren, auf einen Zielwert hin zu kompensieren. Durch das Baukasten-Prinzip wird das Wellenfrontprofil iterativ ermittelt und zu einem Minimum in der Abweichung geführt. Idealerweise besteht der Plattensatz aus weiteren Untersätzen C, D, ... (nicht dargestellt), um die erwünschten Bildfehler gemäß weiterer Zernike-Polynome kompensieren zu können.

[0036] In Fig. 2 ist eine Anordnung von Kreisscheiben mit Untersätzen von jeweils einer Kreisscheibe angeordneten Platten gemäß der vorliegenden Erfindung schematisch dargestellt. Hierbei ist ein Plattensatz 25 mit einzelnen Untersätzen 26.1 bis 26.6 eines Plattensatzes dargestellt, wobei innerhalb der einzelnen Untersätze 26 für jeweils ein spezielles Zernike-Polynom abgestuft Platten verschiedener Amplituden dieses Zernike-Polynoms in jeweils einer Kreisscheibe vorgesehen sind. Besonders vergrößert ist die Kreisscheibe 12.1 dargestellt, auf der Platten 26.1.1 bis 26.1.5 dargestellt sind, die den Abbildungsfehler verschiedener Amplituden eines bestimmten Zernike-Polynoms kompensieren. Daneben ist eine Öffnung 26.1.0 freigelassen worden – dies entspricht der Amplitude 0 für dieses Zernike-Polynom, das heißt eben gerade keiner Korrektur des entsprechenden Abbildungsfehlers bei fehlerfreien optischen Systemen. Darüber hinaus ist ein Beobachtungskanal 15 schematisch durch eine Gerade dargestellt. Durch diesen

Beobachtungskanal 15 kann ein Auge 5 durch jeweils eine Aussparung in der Kreisscheibe zentriert hindurchsehen. Auf das Auge wirkt dann die Summe der im Beobachtungskanal eingeschwenkten Platten der auf den einzelnen Kreisscheiben 12 angeordneten Untersätze 26.

[0037] Um die Abbildungsfehler nun zu ermitteln, werden alle Kreisscheiben 12.1 bis 12.6 so ausgerichtet, dass die Platte mit Amplitude 0 aller Kreisscheiben im Beobachtungskanal 15 zu liegen kommt, das heißt im Ende, dass keine Kompensationen stattfinden. Nun wird eine Kreisscheibe nach der anderen so weitergedreht, dass die durch den Beobachtungskanal 15 schauende Person subjektiv bestimmen kann, ob durch die einzelnen Platten des Untersatzes eine Verbesserung eintritt und wann diese am optimalsten ist. Ist die optimale Kompensation der einzelnen Platte eines Untersatzes gefunden, wird die nächste Kreisscheibe gedreht beziehungsweise in den Beobachtungskanal 15 eingebracht und damit die Platten des nächsten Untersatzes angeboten, bis auch für diesen Abbildungsfehler das Optimum ermittelt ist. Nachdem alle sechs Untersätze über die Kreisscheiben so eingestellt sind, dass jeweils die Platte mit der optimalen Kompensation im Beobachtungskanal 15 eingeschwenkt ist, wirkt auf das Auge 5 die Summe der einzelnen Platten, die die gesamte Wellenfrontdeformation optimal nach dem subjektiven Eindruck der Person kompensiert.

[0038] Mit diesen transparenten Dünnglas- oder Kunststoffplatten und der so geordneten Anzahl von Phasenplatten in einer Kreisscheibe, die in ihrer Sortierung nach der Ordnung der Zernike-Koeffizienten und der jeweiligen Amplitude abgestuft sind, werden diese Platten definiert in das mechanische System beispielsweise eines Phoropters eingebaut, bei dem man in einer Kreisscheibe vorzugsweise Platten einer Ordnung der Zernike-Koeffizienten mit unterschiedlicher Amplitude angeordnet hat. Durch zentrierte Anordnung derartiger Kreisscheiben hintereinander ist es möglich, in eine optischen Achse mit Zieleinrichtung wahlweise Phasenplatten unterschiedlicher Ordnung der Zernike-Koeffizienten und unterschiedlicher Amplitude einzuschwenken. Damit kann man auf dieser optischen Achse mit Ziel- oder Zentriereinrichtungen für das zu korrigierende Auge oder optische System quasikontinuierlich sämtliche Kombination von Abbildungsfehlern höherer Ordnung korrigieren.

[0039] Ein besonderer Vorteil dieser Ausführungsform liegt in der vergleichsweise robusten reproduzierbaren Ausführung, bei der die laterale räumliche Auflösung der Phasenplatten durch die Herstellungstechnologie bestimmt wird und im Submillimeter-Bereich liegen kann. Die additive Struktur der Zernike-Polynome erlaubt eine additive Kompensation der beliebigen Wellenfrontdeformation hin zu einer idealen, gewünschten Wellenfront (ebene Welle, etc.). Durch die Nutzung des Phoropter-Prinzips für Phasenplatten unterschiedlicher Stärke der jeweiligen Aberration höherer Ordnung wird auf ein bewährtes mechanisches System zurückgegriffen. Besonders bevorzugt weist ein derartiger Phasenplatten-Phoropter exakt zentrierte Phasenplatten auf, die hinsichtlich Lage und Winkelabweichung von weniger als 0,1 mm, beziehungsweise 0,1 Grad aufweisen ($dx, dy < 0,1 \text{ mm}$; $dv < 0,1^\circ$), sowie besonders bevorzugt eine Zieleinrichtung für den Patientenblick. Hierdurch ist eine subjektive Wertermittlung der Aberration höherer Ordnungen im Rahmen eines Sehtests (Visusbestimmung) vor einer Korrektur durch Sehhilfen oder Laser möglich. Weiterhin ist es möglich, die Auflösung optischer Momente bei Untersuchung des Augenhintergrunds (Retina) durch Kompensation der Abbildungsfehler höherer Ordnung des speziellen Auges zu optimieren. Weiterhin können Abbildungsfehler höherer Ordnungen beliebigen optischen Systemen mit Hilfe ei-

ner erfindungsgemäßen Vorrichtung ermittelt und kompensiert werden.

[0040] Der Vorgang des Bestimmens einer Aberration des menschlichen Auges unter Einsatz der vorliegenden Erfindung läuft damit typischerweise wie folgt ab: Vor das optische System des Auges wird ein Phasenplättchen P_n^m eines Phasensatzes P^m eingeschwenkt. Das Auge und die optische Achse der Phasenplättchen werden durch eine optische Ziel- und Zentriereinrichtung überlagert. Somit ist es gewährleistet, dass die optischen Zentren des Auges und der Phasenplättchen aufeinanderliegen. Danach wird die Amplitude dieses Phasensatzes erhöht (durch Einschwenken des nächsten Plättchens P_{n+1}^m des Phasensatzes P^m). Dies geschieht iterativ, beziehungsweise alternierend, so lange, bis der subjektiv feste Bildeindruck beim Patienten gefunden ist. Ist dies geschehen, dann ist der Bildfehler, den der Phasensatz P^m beschreibt, zu einem subjektiven Minimum geführt worden. [0041] Im nächsten Schritt wird der oben beschriebene Vorgang mit dem folgenden Satz P^{m+1} von Phasenplatten fortgesetzt, welche einen weiteren zu korrigierenden Bildfehler beschreiben. Dabei bleiben alle bisher gefundenen Phasenplättchen $P_{1...n}^m$ der optimalen Korrektur eingeschwenkt. Durch dieses Verfahren wird der Patient schrittweise zu einem Optimum – also zur Minimierung aller Bildfehler – geführt.

[0042] Die Abstufung der Phasenplättchen erfolgt hierbei derart, dass alle möglichen Amplituden in einem sinnvollen Bereich einstellbar sind. Hierbei wird vom statistischen Aufkommen der Aberrationen bei den optischen Systemen bzw. Patienten ausgegangen. Besonders bevorzugt werden diese Kurven zwischen einem Maximal- und Minimalwert äquidistant ausgebildet.

[0043] Die untere Grenze der Wellenfrontamplitude wird durch das Rayleigh-Kriterium bestimmt, aus dem abgeleitet werden kann, dass sich erst Wellenfrontdifferenzen von größer als $\lambda/4$ signifikant auf die Bildqualität auswirken. Dadurch ist es möglich, subjektiv die Aberration des Auges zu bestimmen und zwar bei Wellenfrontdeformationen höherer Ordnungen, wobei gleichzeitig das natürliche Lichtspektrum genutzt werden kann. Dies ist bei den bekannten Aberrometern zur Bestimmung der Wellenfrontdeformation höherer Ordnung nicht möglich, da diese monochromatisches Licht benötigen.

[0044] Eine weitere vorteilhafte Anwendung der vorliegenden Erfindung soll anhand Fig. 3 gezeigt werden. In Fig. 3 ist eine Anordnung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Untersuchung eines Auges mittels einer Funduskamera schematisch dargestellt. Hierbei ist eine Kamera 6, bzw. ein Mikroskop oder eine Spalllampe dargestellt, die über einen Beobachtungskanal 15 (dargestellt als idealisierte optische Achse in Form einer Geraden) ein Auge 5 beobachten kann. In dem Beobachtungskanal 15 zwischen Auge 5 und Kamera 6 sind Phasenplatten 20.1 bis 20.3 eingebracht worden. Die Wellenfront W1, die aus dem Auge 5 austritt, ist durch Abbildungsfehler aufgrund des suboptimalen optischen Systems das Auge 5 deformiert. Dies ist durch eine entsprechende wellenförmige Darstellung der Wellenfront W1 symbolisiert. Beim Durchtritt durch die Phasenplatten 20.1 bis 20.3 werden diese Fehler höherer Ordnung kompensiert, so dass die dann austretende Wellenfront W2 diese Aberrationsfehler und damit diese Deformationen nicht mehr aufweist und als ebene Welle auf die Kamera 6 trifft.

[0045] Hierdurch wird durch ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eine Anwendung in der Ophthalmologie eröffnet, bei der der hintere Augenabschnitt beobachtet wird. Dieser dient für medizinische Beobachtungen. Für diese hochgenaue und hochauflösende Beobachtung spielt die Aberration des zu untersuchenden Auges eine nicht un-

erhebliche Rolle, da sie die Auflösung des zu untersuchenden Gebiets einschränkt. Um die Aberrationen dieses Auges für Beobachtung mit Funduskamera oder ähnlichem auszugleichen, wird ein Satz von Phasenplättchen in den Strahlengang eingebracht, welche die Aberration vollständig ausgleichen. Damit ist die bestmögliche Beobachtung und Auflösung unter einem Optimum an optischer Qualität möglich.

[0046] Ein weiteres Anwendungsgebiet ist schematisch in Fig. 4 dargestellt. Hierbei wird schematisch die Verwendung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Korrektur des Strahlprofils bei Laserdioden gezeigt. Eine Laserdiode 7 dient als Strahlquelle und emittiert Strahlen entlang eines in der optischen Achse liegenden Beobachtungskanals (schematisch durch eine Gerade 15 dargestellt). Die an der Laserdiode 7 austretenden Strahlen werden sphärozyklisch korrigiert (nicht dargestellt) und treffen als Wellenfront W1 mit Abbildungsfehlern höherer Ordnungen auf Phasenplatten 20.1 bis 20.3. Hier wird das Strahlprofil so korrigiert, dass es als korrigiertes Strahlprofil W2 austritt und eine gewünschte Wellenfront W2 aufweist. Die Formung dieser Wellenfront aus Strahlquellen kann dabei als ebene Welle oder als reines Gaussprofil erwünscht sein. Hierbei geht es um die bewusste Deformierung, beziehungsweise bewusste Formung von Wellenfrontprofilen. Dies ist unter Verwendung einer Vorrichtung der vorliegenden Erfindung sehr leicht und universell möglich. Es lässt sich somit für entsprechende Anwendungen eine sehr feine Korrektur des ermittelten Wellenfrontprofils bewerkstelligen.

[0047] Die Wellenfrontaberrationen werden klassisch erfasst und mittels Phasenplatten der vorliegenden Erfindung auskorrigiert. Damit ist es möglich, jeder Laserdiode, die in ihren Wellenfrontaberrationen stark variieren, ein und dasselbe Wellenprofil zu erstellen. Die vorliegende Erfindung unterscheidet sich hiermit auch stark von dem Fertigen einer Korrekturplatte für eine bestimmte Laserdiode für eine bestimmte optische Anwendung. Beim Ausfall der Laserdiode oder einer Änderung der optischen Anwendung muss diese integrale Korrekturplatte komplett ersetzt werden. Bei Verwendung der vorliegenden Erfindung kann das entsprechend korrigierte Strahlenprofil nachkorrigiert, bzw. für neue Anwendungen ausgerichtet werden. Damit ist es möglich, eine beliebige Formung der Wellenfrontprofile von Strahlquellen durch den universellen Einsatz der vorliegenden Erfindung umzusetzen.

[0048] Mit der vorliegenden Erfindung wurde ein Verfahren einer Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung bereitgestellt, womit es möglich wird, Abbildungsfehler höherer Ordnung mit Hilfe einer geordneten Auswahl von Phasenplatten zielgerecht zu kompensieren. Damit kann man beliebige Wellenfronten, welche man bisher durch sphärische und zylindrische Optiken standardmäßig korrigierte oder auch mit integrierter Kompensation von Abbildungsfehlern höherer Ordnungen der Form asphärischer Ordnungen korrigierte zielgerichtet entsprechend den Amplituden in den einzelnen Ordnungen geordnet, quasikontinuierlich korrigieren. Dabei kann man auf die Verwendung empfindlicher adaptiver Optiken verzichten und ist in die Lage versetzt, optische Abbildungsfehler höherer Ordnung, insbesondere in der Ophthalmologie, mit einem vergleichsweise robusten Instrument reproduzierbar und quasikontinuierlich zu ermitteln und zu kompensieren.

BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung
- 2 Phasenphoropter

- 5 Auge
- 6 Kamera
- 7 Laser
- 10 Phoropter
- 12 Kreisscheibe
- 15 Beobachtungskanal
- 20 Platte
- 21 Optisch aktive Strukturen
- 25 Plattensatz
- 10 26 Untersatz eines Plattensatzes (25)

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnungen in einem optischen System, insbesondere in einem Auge (5), umfassend mindestens einen Beobachtungskanal (15), in den definierte Platten (20) einbringbar sind **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Platten (20) optisch aktive Strukturen (21) aufweisen, die zu einem definierten Zernike-Polynom und zu einer definierten Amplitude dieses Zernike-Polynoms korrespondieren, wobei mindestens ein Zernike-Polynom eine Ordnung größer als zwei aufweist.
2. Vorrichtung (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass ein Plattensatz (25) von Platten (20) vorgesehen ist, der optisch aktive Strukturen (21) zur Kompensation von Abbildungsfehlern mindestens eines definierten Zernike-Polynoms aufweist.
3. Vorrichtung (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass ein Plattensatz (25) einen Untersatz (26) an Platten (20) aufweist, der einzelne Platten (20) mit optisch aktiven Strukturen zur Kompensation von Abbildungsfehlern unterschiedlicher Amplituden für ein (25) definiertes Zernike-Polynom aufweist.
4. Vorrichtung (1) nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Plattensatz (25) auf einer Kreisscheibe (12) angeordnet ist.
5. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung (1) als Phoropter (2) ausgebildet ist.
6. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich eine Zieleinrichtung für den Patientenblick vorgesehen ist.
7. Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Platten (20) aus Glas oder Kunststoff hergestellt sind.
8. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, zur subjektiv bewerteten Ermittlung der Aberration höherer Ordnung im Rahmen einer Visusbestimmung; Optimierung der Auflösung optischer Instrumente; Korrektur des Strahlprofils von Strahlquellen insbesondere von Laserdioden; oder individuellen Korrektur von Sehfehlern, insbesondere bei der Verwendung optischer Instrumente.
9. Verfahren zur subjektiven Bestimmung eines Abbildungsfehler einer speziellen höheren Ordnung X in einem optischen System, insbesondere einem Auge (5), dadurch gekennzeichnet, dass in einem ersten Schritt eine Platte (20) in einen Beobachtungskanal des optischen Systems eingeführt wird,

wobei die Platte (20) optisch aktive Strukturen aufweist, die zu einem definierten Zernike-Polynom und zu einer definierten Amplitude korrespondieren, wobei die Ordnung X des Zernike-Polynomes größer als zwei ist;

in einem zweiten Schritt eine subjektive Beurteilung der aktuellen Wellendeformation der definierten Ordnung X erfolgt und

in einem dritten Schritt durch wiederholtes Anwenden des ersten Schrittes mit Platten anderer Amplitudenkorrektur desselben definierten Zernike-Polynoms und des zweiten Schrittes der subjektiven Beurteilung die Platte und damit die Amplitudenkorrektur ermittelt wird, die diesen Abbildungsfehler der speziellen höheren Ordnung X subjektiv am besten kompensiert.

10. Verfahren zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern spezieller höherer Ordnungen X_1 bis X_n in einem optischen System, insbesondere einem Auge (5), dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch für jeden der Abbildungsfehler X_1 bis X_n nacheinander durchgeführt wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

25

30

35

40

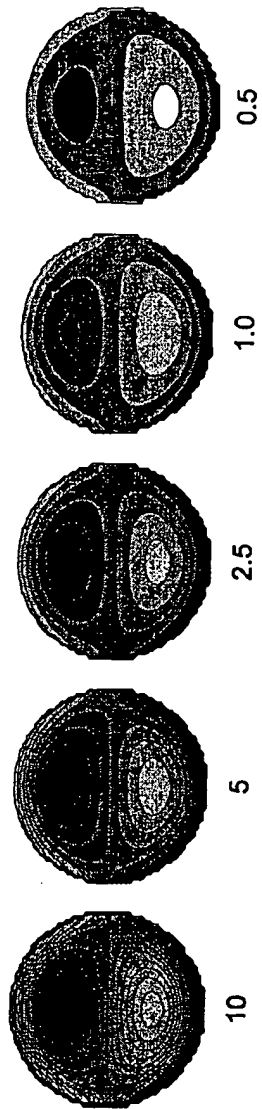
45

50

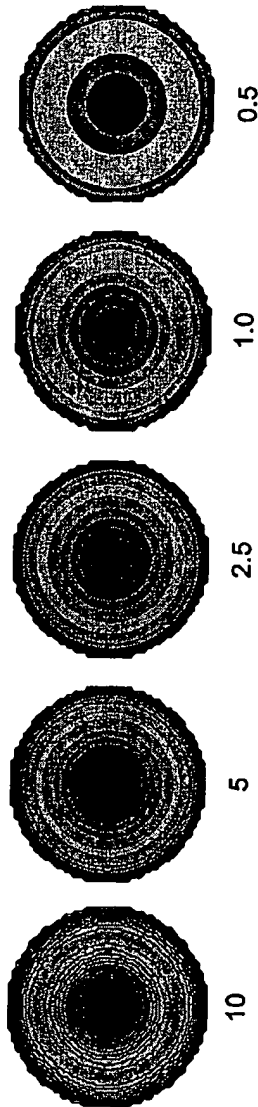
55

60

65



A



B

Fig. 1

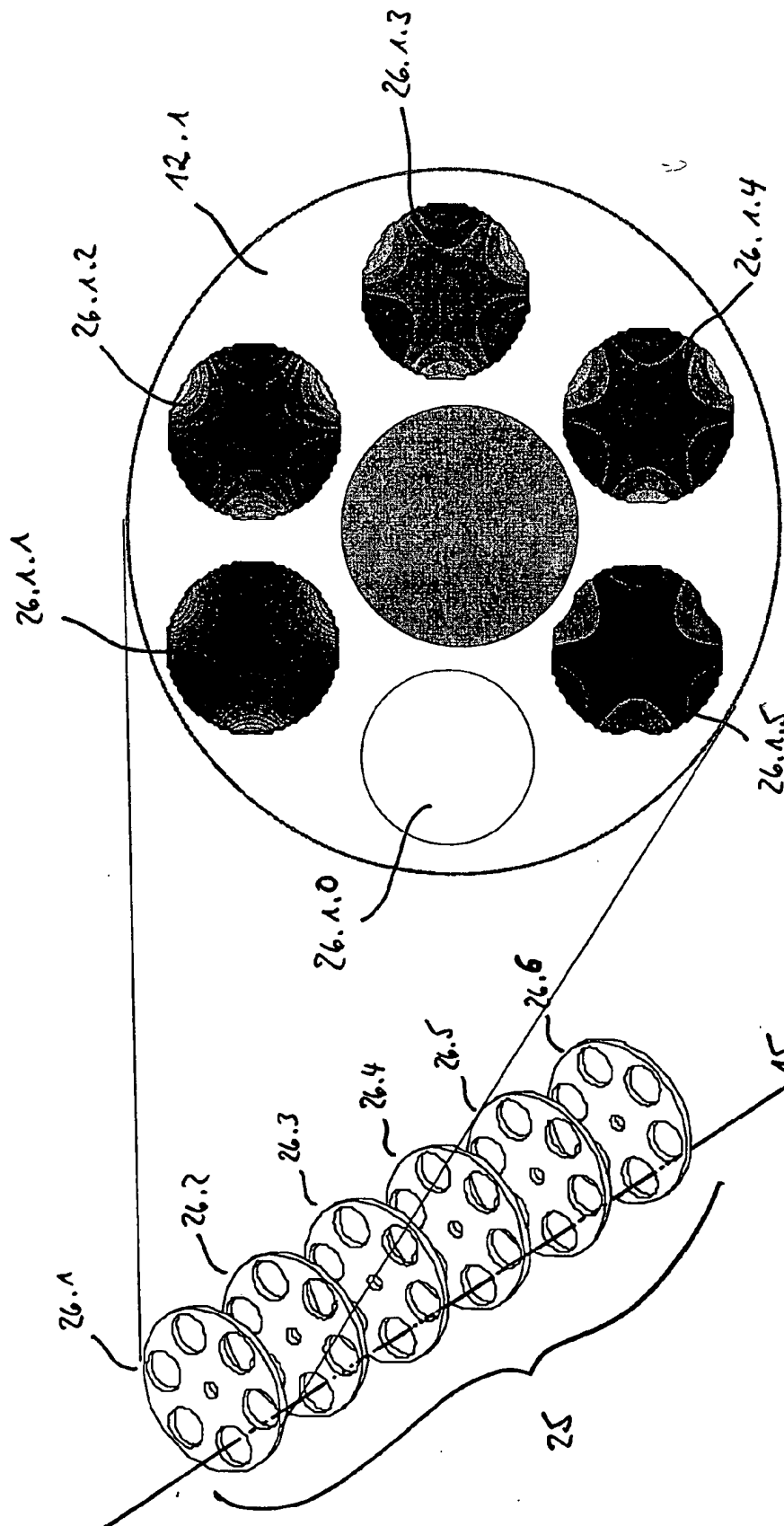


Fig. 2

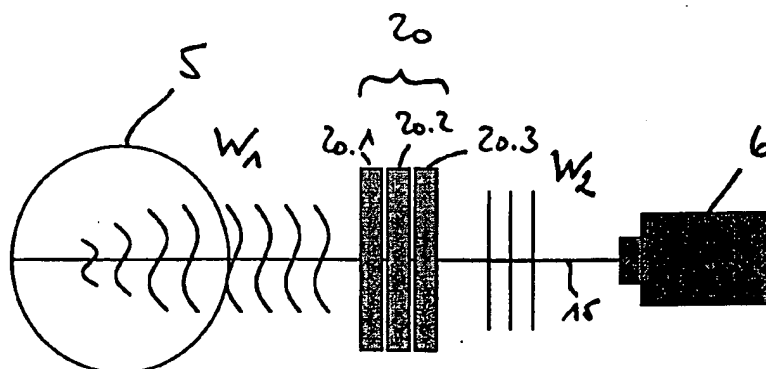


Fig. 3

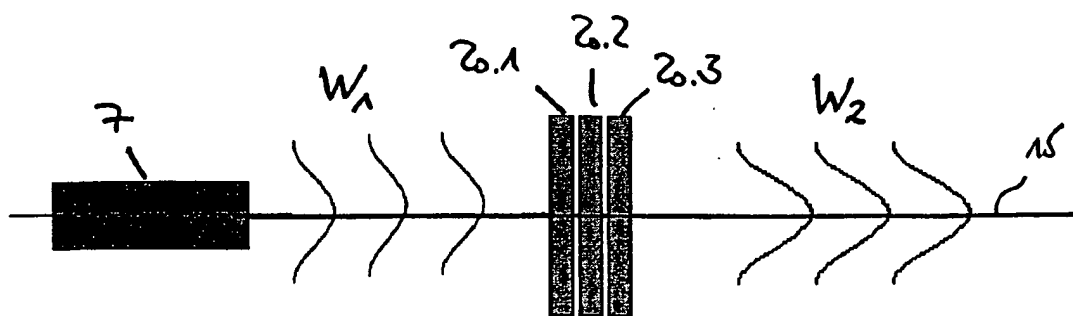



Fig. 4

Verfahren und Vorrichtung zur subjektiven Bestimmung von Abbildungsfehlern höherer Ordnung

Patent number: DE10103763
Publication date: 2002-08-22
Inventor: MAEUSEZAHN HOLGER (DE); SCHROEDER ECKHARD (DE); DICK MANFRED (DE)
Applicant: ASCLEPION MEDITEC AG (DE)
Classification:
- **international:** A61B3/02
- **european:** A61B3/04
Application number: DE20011003763 20010127
Priority number(s): DE20011003763 20010127

Also published as:

 WO02060319 (A1)

Abstract of **DE10103763**

The invention relates to a method and device for the subjective determination of image defects of a higher order Ξ in an optical system, especially in an eye (5), comprising at least one observation channel (15) in which defined plates (20) can be introduced, the individual plates (20) having optically active structures (21) that correspond to a defined Zernike polynomial and to a defined amplitude, at least one order Ξ of the Zernike polynomials being greater than two.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide